

# Energie, Umwelt, Klima

Kärner, Hermann

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1996 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.61-66



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HERMANN KÄRNER, Braunschweig

**Energie, Umwelt, Klima\***

Braunschweig, 12. April 1996

**Einleitung**

Der Energiebedarf der Menschheit zeigt seit etwa 100 Jahren einen exponentiellen Anstieg, der durch die zunehmende Industrialisierung, insbesondere aber durch den ungebremsten Anstieg der Weltbevölkerung verursacht ist: betrug der Weltenergieverbrauch im Jahre 1900 weniger als 1 Mrd. t SKE bei einer Weltbevölkerung von etwa 1 Mrd., so liegt er heute bei 13 Mrd. t SKE, und es leben fast 6 Mrd. Menschen auf der Erde (SKE = Steinkohle-Einheit; 1 t SKE bedeutet den Energieinhalt einer Tonne Steinkohle; alle Primärenergiequellen werden aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit im folgenden immer auf diese Energieeinheit umgerechnet). Weltkriege, Wirtschafts- und Ölkrisen konnten diese Entwicklung nur kurzzeitig verzögern, aber nicht grundsätzlich ändern. Angesichts einer unvermindert steigenden Weltbevölkerung und einer zunehmenden, energieintensiven Industrialisierung der Schwellen- und Entwicklungsländer wird der Weltenergieverbrauch weiter steigen. Da der durchschnittliche weltweite Pro-Kopf-Jahresverbrauch seit mehreren Jahrzehnten bei 2 t SKE liegt, das sind umgerechnet 50 kWh je Person und Tag, läßt sich für die nähere Zukunft der Energiebedarf unmittelbar aus der Bevölkerungsentwicklung ableiten. Neben dem Energieverbrauch von 50 kWh pro Person und Tag nimmt sich der tägliche Nahrungsbedarf von etwa 3 kWh je Person und Tag eher bescheiden aus, und es wird deutlich, daß die Bereitstellung von genügend bezahlbarer Energie eine für die Zukunft der Menschheit entscheidende Herausforderung werden wird.

Heute und in der voraussehbaren Zukunft werden 90 % des Weltenergiebedarfs aus fossilen Primärenergien gedeckt: Erdöl und Erdgas sind mit zusammen 60 % beteiligt, während mit Kohle 30 % gedeckt werden. An nichtfossilen Primärenergien sind nur die Kernenergie und die Wasserkraft zu erwähnen, andere regenerative Energieformen spielen keine Rolle und können, wie gezeigt werden wird, auch in nächster Zukunft nur marginale Beiträge leisten. Das Dilemma, dem sich die Menschheit gegenüber sieht, wird durch die mit dem fossilen Energieverbrauch verbundene Emission von Schadstoffen verursacht, die im wesentlichen in der Atmosphäre deponiert werden. Während Staub, Schwefel, Stickoxide und einige weitere anthropogene Schadstoffe durch mehr oder weniger aufwendige technische Maßnahmen zumindest teilweise ausfilterbar sind, wird das Verbrennungsprodukt  $\text{CO}_2$  ungehindert in die Atmosphäre entlassen. Dort kann es, wie aus der Diskussion in den Medien hinlänglich bekannt ist, über den Treibhauseffekt eine

---

\* Kurzfassung eines Vortrags vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften

Klimaveränderung und damit eine massive Beeinflussung der Lebensverhältnisse auf der Erde bewirken.

### **Anthropogene Belastung der Atmosphäre mit Schadstoffen**

Eine wachsende Menschheit braucht mehr Nahrung und Energie, und sie produziert unvermeidbar mehr Müll. Aus ökologischen Gründen muß Müll künftig kontrolliert, ortsfest und jederzeit rückholbar gelagert werden: Entsorgungskonzepte sind ebenso wichtig wie Versorgungskonzepte. Die derzeit auf fossilen Primärenergien basierte Energieversorgung der Menschheit verfehlt dieses Ziel bei weitem, denn der Abfall der Energiewandlung aus Öl, Gas und Kohle wird unkontrolliert, fein verteilt und kaum rückholbar in der irdischen Atmosphäre deponiert. Es ist zu befürchten, daß dadurch klimatische Veränderungen ausgelöst werden, die erhebliche globale Auswirkungen haben können.

Verbrennungsprozesse verursachen über Rauchgase eine Staubbelastung der Atmosphäre. Daran sind elektrische Energieerzeugung, industrielle Prozesse und Verkehr gleichermaßen beteiligt. Durch Filtrierung, Auswaschung und Zyklonabscheidung sind schädliche Stäube heute aber mit technisch und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand so weit rückhaltbar, daß eine Gefährdung ausgeschlossen ist. Ebenso verhält es sich mit Schwefeldioxid und Stickoxiden, die zwar mit hohem, aber noch vertretbarem Aufwand aus Rauchgasen extrahiert werden können. Allerdings muß bedacht werden, daß bei globaler Betrachtung der Anteil an der Entschwefelung und Entstickung von Rauchgasen durch die Industrieländer nur einen marginalen Beitrag zur weltweiten Reinhaltung der Luft liefern kann, weil Entwicklungsländer wie beispielsweise die Volksrepublik China ungeheure Mengen drastisch verschmutzter Rauchgase ungefiltert in die Atmosphäre entlassen. Besserung dieser Situation ist in voraussehbaren Zeiträumen nicht zu erwarten.

Die als Treib- und Kühlgase verwendeten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe sind wegen ihrer ozonzerstörenden Wirkung in hohen Atmosphärenschichten als klima- und gesundheitsschädlich erkannt worden und unterliegen in vielen Ländern deshalb bereits einem Anwendungsverbot; sie sollten daher in Zukunft keine gefahrbringende Rolle mehr spielen. Radioaktive Stoffe sind durch Filtrierung und chemische Bindung der Emissionen von Kernkraftwerken zuverlässig in unverdächtigen Grenzen zu halten; die Rauchgase aus konventionellen Kohlekraftwerken führen derzeit zu einer höheren radioaktiven Belastung der Atmosphäre als die Emissionen von Kernkraftwerken.

Neben diesen kontrollierbaren Schadstoffemissionen gibt es allerdings zwei Bereiche, die sich derzeit und in der voraussehbaren Zukunft einer Kontrolle entziehen, nämlich die Anreicherung der Atmosphäre mit  $\text{CO}_2$ , dem Verbrennungsprodukt aller fossilen Primärenergien, und die Erzeugung von Methan durch die Verdauungsprozesse in den Vormägen von Rindern. Beide Vorgänge hängen unmittelbar mit der Entwicklung der Erdbevölkerung zusammen: Mehr Menschen brauchen mehr Energie und mehr Nahrung. Kohlenstoffdioxid ist mit 50 %, Methan mit 20 % am Treibhauseffekt der atmo-

sphärischen Spurengase beteiligt. Die jährliche Ablagerung von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre beläuft sich derzeit auf etwa 30 Mrd. Tonnen mit deutlich zunehmender Tendenz. Seit 1750 hat der  $\text{CO}_2$ -Gehalt von 280 ppm (parts per million) auf heute ca. 360 ppm zugenommen. Damit ist innerhalb weniger Jahrhunderte durch anthropogene Einwirkung ein Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Atmosphäre verursacht worden, wie er zuletzt vor etwa 60 Millionen Jahren, also zum Ende des Zeitalters der Saurier, vorhanden war.

## Klimawirksamkeit von $\text{CO}_2$

Die Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid beruht auf dem Effekt, daß die Abstrahlung infraroten Lichts von der Erde in das Weltall behindert wird und dadurch die Gefahr einer spürbaren Erhöhung der Durchschnittstemperatur entsteht. Die bekannten Folgen wären u.a. eine Verschiebung der Klimazonen und damit drastische Änderungen der Lebensbedingungen. Wohl ist dies in der Wissenschaft noch umstritten, weil die komplexen klimatischen Vorgänge in ihrer Wechselwirkung schwer durchschaubar sind und die Speicherfähigkeit der Weltmeere für  $\text{CO}_2$  noch nicht richtig eingeschätzt werden kann. Die rasche Zunahme von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre läßt sich aber nicht wegdiskutieren, sie ist meßtechnisch einwandfrei erfaßt und auch ihre Verursachung durch anthropogene Aktivitäten steht heute außer Zweifel. Betrachtet man die  $\text{CO}_2$ -Veränderung in einem erdhistorischen Maßstab, so stellt die in den beiden letzten Jahrhunderten erfolgte und in den nächsten 50 Jahren unvermeidbar noch kommende  $\text{CO}_2$ -Emission geradezu eine Impulsbelastung der Atmosphäre dar, auf die die Natur in irgendeiner Weise reagieren wird. Da das einmal in der Atmosphäre deponierte Kohlenstoffdioxid mit vertretbarem technischen Aufwand nicht mehr rückholbar ist, muß im Sinne der Vorsorge rechtzeitig zu Gegenmaßnahmen gegriffen werden.

Die einzige irdische  $\text{CO}_2$ -Senke ist die Photosynthese im Chlorophyll der Pflanzen: Wasser und Kohlenstoffdioxid werden unter Einsatz von Lichtenergie in Glukose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  umgewandelt. Dieser Stoff steht also am Anfang einer jeden Nahrungskette. Durch Veratmung und Verbrennung in Lebewesen, aber auch durch Verrottung, Verwitterung und Verfaulung von toter biologischer Materie wird dieser Prozeß unter Freisetzung von Energie umgekehrt. Über lange irdische Zeiträume waren Erzeugung und Verbrauch von  $\text{CO}_2$  im Gleichgewicht, nachdem das aus der Erduratmosfera stammende Überangebot an  $\text{CO}_2$  durch die Photosynthese in hochwertige organische Stoffe umgewandelt und in geologischen Schichten als Kohle, Erdöl, Erdgas, Torf usw. gespeichert worden war. Die menschlichen Aktivitäten haben dieses Gleichgewicht nachhaltig gestört: durch Verbrennung fossiler Energieträger kommen jährlich etwa 5 Mrd. t Kohlenstoff, durch Brandrodung etwa weitere 2 Mrd. t Kohlenstoff mehr in die Atmosphäre, als ihr durch die Photosynthese wieder entzogen werden.

Es gibt mehrere Klimamodelle, auf deren Details hier nicht eingegangen werden kann. Ein physikalisch sehr einleuchtendes Modell geht davon aus, daß bei Unterschreiten einer kritischen  $\text{CO}_2$ -Grenze der Atmosphäre, die zu etwa 200 ppm angenommen wird, der natürliche Treibhauseffekt aussetzt, die Erde abkühlt und deshalb eine Eiszeit

eingeleitet wird. Die dadurch reduzierte Menge an Chlorophyll bewirkt eine Verringerung der Entnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre durch Photosynthese, während die  $\text{CO}_2$ -Produktion durch Verrottung toter Materie in der Pedosphäre etwa konstant bleibt, was zu einer Anreicherung von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre und damit zu einer Temperaturerhöhung, also zur Einleitung einer Warmzeit führt. Dieses Modell vermag den häufigen Wechsel von Eis- und Warmzeiten in der jüngeren Erdvergangenheit einsichtig zu erklären, und es würde die von mehreren Seiten geäußerte Erwartung bestätigen, daß die anthropogene  $\text{CO}_2$ -Belastung der Atmosphäre zu nennenswerten Temperaturerhöhungen führen wird.

### **Die Rolle der regenerativen Primärenergiequellen und der Kernenergie**

Auch wenn die Klimawirksamkeit der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Anreicherung noch umstritten ist, tun Technik und Wissenschaft sicher gut daran, Maßnahmen zur Reduzierung der unkontrollierten  $\text{CO}_2$ -Emission in die Atmosphäre nicht nur zu überlegen, sondern dringend einzuleiten. Da wegen der noch immer stark wachsenden Erdbevölkerung eine Verringerung des Energieverbrauchs nicht eintreten kann, ist es geboten, eine bessere Nutzung des Energiegehalts fossiler Brennstoffe zu realisieren, oder besser auf fossile Primärenergieträger möglichst ganz zu verzichten. Über Wirkungsgradverbesserungen, erhöhte Wärmedämmung und ähnliche Maßnahmen ist in den letzten 2 Jahrzehnten tatsächlich eine deutliche Nutzungsverbesserung erreicht worden, die aber das grundsätzliche Problem allenfalls mildern, keinesfalls lösen kann. So bleibt also nur die Hoffnung auf einen verstärkten Einsatz nichtfossiler Primärenergiequellen, zu denen neben den regenerativen Quellen natürlich auch die Kernenergie zählt.

Neben der bedeutungslosen Gezeitenenergie, die auf Gravitationskräften beruht und in einigen wenigen Gezeitenkraftwerken genutzt wird, und der ebenfalls nur in geringem Umfang verfügbaren Erdwärme, spielen die von der Sonne unmittelbar oder mittelbar ausgehenden regenerativen Energien die wesentliche Rolle. Dies sind Wasserkraft, die heute für die elektrische Energieversorgung schon am meisten genutzte „Sonnenenergie“, Windkraft, die sich in einer lebhaften Entwicklung befindet, allerdings nur mit massiven Subventionen technisch überleben kann, weiterhin Biomasse, deren Anteil an der Stromerzeugung durch Müllkraftwerke heute schon nennenswert ist, und schließlich die solare Strahlung, die sowohl thermisch als auch elektrisch – über photovoltaische Wandler – nutzbar gemacht wird. Zumindest in unseren Breiten sind die Anteile am Primärenergieverbrauch, die diese regenerativen Quellen bei maximaler Nutzung bringen können, aber eher marginal: ihr Potential ist so gering, daß nur Bruchteile, unter optimalen Bedingungen vielleicht bis zu 10 % des Primärenergieverbrauchs, bis zum Jahr 2020 durch sie gedeckt werden können.

Lediglich die Solarwasserstofftechnik stellt eine Option dar, die in ferner Zukunft einmal einen erheblichen Beitrag zum Primärenergieaufkommen der Menschheit leisten könnte. Diese Technologie, die heute in ersten Ansätzen experimentell untersucht wird, wandelt in sonnenreichen Gebieten das Licht direkt in elektrische Energie um, die ihrer-

seits zur Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff verwendet wird. Während der Sauerstoff in die Atmosphäre entweicht, wird Wasserstoff in Pipelines oder – verflüssigt – in Tankern zum Anwender gebracht. Dort kann er für Heizung und Kühlung, zur elektrischen Stromerzeugung und als Antriebsenergie für Fahrzeuge in ähnlicher Weise verwendet werden wie heute etwa Erdgas. Da unter Verbrauch von atmosphärischem Sauerstoff als Verbrennungsprodukt reines Wasser entsteht, ist diese Lösung ökologisch außerordentlich verträglich. Allerdings stehen einer raschen Umsetzung solcher Ideen zwei entscheidende Probleme im Wege: die heute verfügbaren solaren photovoltaischen Wandler haben einen zu kleinen Wirkungsgrad, und selbst bei Vorhandensein einer technisch ausgereiften Lösung würde eine Umstellung der Weltenergiewirtschaft auf solaren Wasserstoff mindestens 50 Jahre dauern, da die gesamte notwendige industrielle Struktur erst geschaffen werden müßte und eine solche Maßnahme einen ungeheuer großen Finanzierungsbedarf haben würde.

Die Kernenergie als Primärquelle ist in unserem Lande zu etwa 1/3 an der elektrischen Energieversorgung beteiligt und ist daher jetzt und in der voraussehbaren Zukunft unverzichtbar. Ihr Hauptvorteil ist nach wie vor ökonomischer Art: Strom aus Kernkraftwerken ist trotz hoher Regelungsdichte konkurrenzlos billig. Mehr und mehr setzt sich aber die Erkenntnis durch, daß die Nutzung der physikalisch gebundenen Energie der Atome auch deshalb geboten ist, weil Kernenergie  $\text{CO}_2$ -frei umsetzbar ist und andere Emissionen sicher beherrscht werden können. Die  $\text{CO}_2$ -Emission der gesamten Bundesrepublik liegt derzeit bei etwa 800 Mio t jährlich, davon entfallen etwa 200 Mio t auf die elektrische Stromerzeugung aus fossil befeuerten Kraftwerken. Wollte man die Kernkraftwerke abschalten und mangels Alternativen durch Kohlekraftwerke ersetzen, so würde die  $\text{CO}_2$ -Belastung der Atmosphäre schlagartig um 150 Mio t jährlich zunehmen. Allein in Deutschland reduziert die Kernenergie also den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß um 150 Mio t jährlich, weltweit sind es mehrere Mrd. Tonnen.

Nicht nur aus diesem Grunde sollte sich aber die Einstellung zur Kernenergie grundsätzlich ändern: Kernenergie ist, sieht man von der gravitationsbedingten mechanischen Energie einmal ab, die einzige wirkliche Basisenergie im Weltall. In der Sonne wie in allen anderen Fixsternen spielen sich ständig gewaltige Energieumsätze durch Kernfusionsvorgänge ab, die die Voraussetzung für die Energieabstrahlung in das All darstellen, also auch für unser lebensspendendes und lebenerhaltendes Sonnenlicht. Jegliche sonnenbasierte regenerative Energieform ist also nuklearen Ursprungs. Das gilt natürlich auch für Kohle, Erdöl und Erdgas, denn diese Primärenergien sind ja nichts anderes als durch die Photosynthese „kondensiertes“ Sonnenlicht. Nichtnuklearen Ursprungs ist letztlich nur die Gezeitenenergie, denn auch die Erdwärme entsteht hauptsächlich durch den Zerfall radioaktiver Isotope. Ein gleichermaßen schwieriges wie faszinierendes wissenschaftlich-technisches Unterfangen ist die Anwendung von Kernfusionsvorgängen zur irdischen Energieerzeugung. Gelingt die kontrollierte Kernfusion in technisch relevantem Umfang, so hat die Menschheit energietechnisch ausgesorgt, denn das leichte Element Wasserstoff, der Brennstoff der nuklearen Fusion, ist nahezu unbegrenzt verfügbar. Der Stand der Forschung auf diesem Gebiet läßt allerdings kaum erwarten, daß technisch ausgereifte Lösungen vor der Mitte des nächsten Jahrhunderts verfügbar sein werden.

## Zusammenfassung

Die Menschheit steht vor schwierigen Versorgungsproblemen hinsichtlich ihres Energiebedarfs. Nur die ständige Verfügbarkeit sauberer und bezahlbarer Energie sichert ihre Zukunft. Die Analyse der gegenwärtigen Situation und die Projektion auf die Zukunft führt zu folgenden Ergebnissen:

- Der Energiehunger der Entwicklungsländer und der Anstieg der Weltbevölkerung lassen den Primärenergieverbrauch, ausgehend von einem hohen Niveau von derzeit ca. 13 Mrd t SKE, weiter steigen.
- Heute und in der voraussehbaren Zukunft werden etwa 90 % der Primärenergie weltweit aus fossilen Brennstoffen gedeckt. Das führt unvermeidbar zur CO<sub>2</sub>-Anreicherung der Atmosphäre und läßt Klimaveränderungen erwarten.
- Sparsamer Umgang mit Energie und Nutzung nichtfossiler Energien sind dringend geboten.
- Die regenerativen Primärenergien können in der voraussehbaren Zukunft nur einen kleinen Beitrag zur Substitution fossiler Quellen leisten. Allein die Solarwasserstoff-Technologie bietet Chancen, einen nennenswerten Teil der Primärenergie nichtfossil zu decken. Diese Technologie benötigt nach erfolgreicher Entwicklung eine Einführungszeit von mehreren Jahrzehnten.
- Aus ökologischen Gründen muß die Lagerung von Abfällen aller Art künftig kontrolliert, ortsfest und rückholbar erfolgen. Derzeitige und künftige Energietechnologien sind an dieser Forderung zu messen.
- Kernfusion ist eine interessante Energievariante, deren großtechnische Realisierbarkeit frühestens in 50 Jahren in Aussicht steht. Kernspaltung als Energiequelle ist derzeit unverzichtbar.
- Politik und Religionen sind gefragt, die Bevölkerungsexplosion einzudämmen.
- Es gibt keine Patentlösung.

Diese Zusammenfassung ist keineswegs eine Bankrotterklärung der Energietechnik, sondern summiert auf die Herausforderungen an kommende Generationen von Naturwissenschaftlern und Technikern. Energie ist eine Grundsubstanz für Leben, ohne Energie gibt es kein Leben. Um diese Lebensbasis zu sichern, bedarf es vielleicht auch unkonventioneller Ansätze. Warum sollte es nicht gelingen, der Natur das Geheimnis der Photosynthese abzulauschen, noch mehr, dieses auch in großtechnische Lösungen umzusetzen? Dies wäre ein Schritt zur Kontrolle der CO<sub>2</sub>-Belastung der Atmosphäre, aber auch zur Schaffung einer sonnenunabhängigen Nahrungsquelle. Es gibt also noch viel zu tun!

---

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.C. Kärner  
 Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig  
 Schleinitzstraße 23 · 38106 Braunschweig